

# **CALIBRAÇÃO POR COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA DE UM CIRCUITO DE CIRCULAÇÃO NATURAL**

**Antônio Salvador Neto<sup>\*</sup>, Pedro A. M. Vinhas<sup>\*\*</sup> e José L. H. Faccini**

Instituto de Engenharia Nuclear – IEN/CNEN  
Cidade Universitária, Ilha do Fundão  
CEP 21941-906 - Rio de Janeiro, RJ

<sup>\*</sup>[antsal@poli.ufrj.br](mailto:antsal@poli.ufrj.br)

<sup>\*\*</sup>[pedro\\_mvinhas@poli.ufrj.br](mailto:pedro_mvinhas@poli.ufrj.br)

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta os procedimentos de calibração por comparação do sistema de aquisição de dados de temperatura do Circuito de Circulação Natural (CCN) do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN).

A instrumentação do circuito compreende 12 termopares do tipo K, um medidor de vazão eletromagnético, um sistema de aquecimento e controle, e um sistema de aquisição de dados de temperatura e vazão. A medição de temperaturas no CCN requer o conhecimento dos erros e incertezas dos equipamentos e sistemas envolvidos na medição. Para isso foi feita uma montagem experimental em bancada, formada por um banho termostático, um termômetro de bulbo de referência, doze termopares do tipo K e o sistema de aquisição de dados. A análise foi feita em duas etapas: inicialmente foi feita uma avaliação estatística dos sinais dos termopares, através das diferenças das leituras entre eles. A segunda etapa consistiu na avaliação das incertezas envolvidas no procedimento de calibração utilizado.

## **1. INTRODUÇÃO**

Em um circuito experimental de circulação natural, os fenômenos de transporte ocorrem devido às diferenças de temperaturas nas diferentes partes do circuito. A utilização de termopares para medição das temperaturas durante a circulação natural é uma prática já consagrada entre os experimentalistas, sendo a finalidade principal das medições o controle das temperaturas durante a operação do circuito [1].

O objetivo deste trabalho é realizar uma calibração por comparação do Sistema de Aquisição de Dados de Temperatura (SADT) do Circuito de Circulação Natural (CCN) do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN). Para analisar dados de temperatura obtidos através do uso de termopares é necessário analisar os erros e incertezas dos equipamentos de medição e dos sistemas de aquisição a fim de obter-se uma boa exatidão, uma maior segurança operacional, um aumento da eficiência e uma melhoria na qualidade dos dados. Podem-se usar dois métodos para calibrar o SADT: o primeiro é o da calibração por pontos fixos ou absolutos, baseado nos sinais gerados por um termopar em referência a pontos fixos de temperatura tais como pontos de solidificação, ebulição e pontos triplos de substâncias puras, padronizadas atualmente pela Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90), [2].

O segundo é o da calibração por comparação, baseado na comparação dos sinais gerados por um termopar com um termômetro de referência, ambos posicionados no mesmo meio termostático. Para garantir a exatidão, a estabilidade, a reprodutibilidade e a repetibilidade da calibração é recomendado evitar o uso contínuo, além de todos os cuidados na manipulação do termômetro de referência, como evitar o contato direto com as mãos e não submetê-lo a grandes esforços. Neste trabalho optou-se por usar o segundo método de calibração, usando-se um termômetro de líquido em vidro como referência, [2].

## **2. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL**

### **2.1. Descrição do SADT**

O Sistema de Aquisição de Dados de Temperatura (SADT) é constituído por 12 termopares do tipo K, Chromel-Alumel, com diâmetro de 1,5 mm fabricados e calibrados pela ECIL S.A, capazes de medir temperaturas na faixa de -50 a 1350°C. O sistema também possui um módulo TC-2190 da National Instruments, que faz a leitura analógica, corrige e amplifica os sinais dos termopares. Os sinais amplificados são enviados a um computador PXI, também da National Instruments, [3], controlado através de um programa em linguagem LabView, o qual registra a cada 10 segundos as temperaturas obtidas em cada um dos 12 termopares exibindo-as em uma tela gráfica em tempo real, e gravando os dados em uma planilha no formato txt.

### **2.2. Montagem experimental para calibração do SADT**

Para efetuar a calibração do SADT, foi utilizado um banho termostático da marca Haake, modelo N2-B, que consiste de um recipiente isolado termicamente, um resistor aquecedor, um dispositivo de circulação do banho e um controlador de potência. A temperatura no banho pode variar de -100 a +200 °C. Com o resistor em funcionamento, ou seja para temperaturas superiores a do ambiente, o aquecimento do banho é garantido para a faixa de 45 a 200 °C, [4]. Foram utilizados dois termômetros de bulbo como termômetros de referência, com escalas de 0 °C a 50 °C e de 50 °C a 100 °C, com divisões de 0,1°C e incerteza de 0,03°C previamente calibrados, [5] [6].

A bancada de testes foi composta pelos mesmos equipamentos utilizados no SADT: os 12 termopares K (inseridos no banho termostático), o módulo TC-2190 e o computador PXI. Como fluido de trabalho foi utilizada água destilada, com variação de temperatura entre a ambiente e 95° C, sendo que a temperatura ambiente variou entre 27 a 32° C durante a calibração. A água encontrava-se em constante movimentação, devido ao dispositivo do banho, garantindo a homogeneidade da temperatura da água no seu interior. Como tampa do banho foi utilizada uma placa de amianto revestida de isopor de 25,0 mm de espessura, que funcionava como isolante térmico e apoio para os termopares e o termômetro de referência. A placa possuía 13 furos, sendo 12 de diâmetros iguais a 3,5 mm organizados em forma circular com simetria radial, diâmetro igual a 84,0 mm, onde ficavam localizados os suportes para os termopares. E 1 furo no centro de 11,0 mm que recebia o suporte para o termômetro de referência.

Para fixação dos termopares foram utilizados dois tipos de suporte. O primeiro tipo continha 12 tubos de vidro com 4,0 mm de diâmetro e 150,0 mm de comprimento, fixados no isopor da

tampa com material colante. Cada tubo se encaixa em um dos 12 furos da tampa do banho, ficando 100,0 mm dentro do recipiente e 25,0 mm acima da tampa, funcionando como apoio para o termopar. O segundo suporte garantia o alinhamento dos tubos sendo formado por uma placa de amianto em formato circular, com 115,0 mm e com 12 furos idênticos ao da tampa do banho, localizado próximo ao ponto médio dos tubos de vidro a fim de assegurar uma simetria cilíndrica do conjunto de tubos e termopares.

### 2.3. Procedimentos Experimentais

Foram realizados testes preliminares para verificar o funcionamento individual dos termopares, dos equipamentos e programas envolvidos na calibração. A verificação foi feita realizando-se combinações entre as posições dos termopares e os canais de entrada no módulo amplificador, observando-se a igualdade das temperaturas medidas. Os testes foram realizados em todas as faixas de temperaturas nas quais seriam realizadas as calibrações, possibilitando ajustes na montagem experimental.

Para a calibração foi preparado um roteiro contendo os procedimentos de inicialização e configuração da bancada de testes. As medições de temperatura dadas pelo termômetro de referência eram registradas durante um período de 1 minuto, aproximadamente. Foram realizadas 5 operações do banho nas condições apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1. Condições das operações de calibração realizadas.**

|                                   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Temperaturas (°C)                 | Amb  | 40,0 | 45,0 | 50,0 | 70,0 | 75,0 | 80,0 | 85,0 | 90,0 | 95,0 |
| Número de repetições <sup>a</sup> | 5    | 5    | 3    | 5    | 3    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    |
| Temperatura máx. (°C)             | 37,1 | 41,6 | 45,7 | 50,9 | 70,2 | 75,1 | 80,3 | 85,4 | 90,3 | 95,3 |
| Temperatura mín. (°C)             | 28,5 | 40,4 | 45,0 | 49,9 | 70,0 | 75,0 | 79,9 | 84,9 | 89,8 | 94,8 |

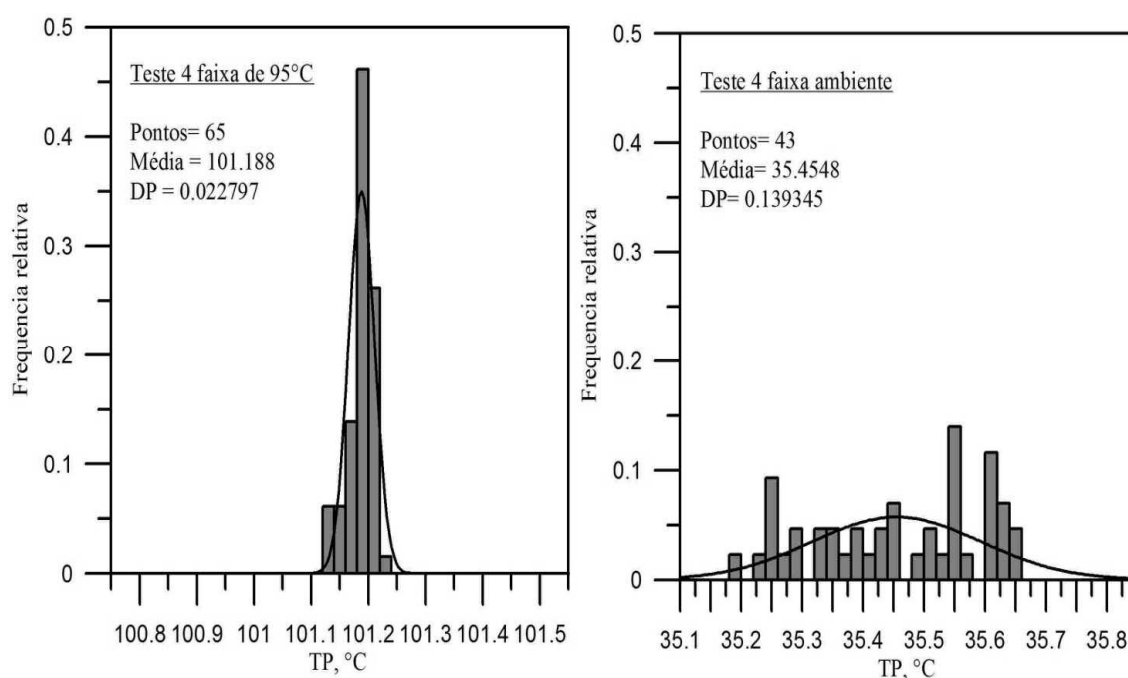
a. devido dificuldades para a visualização da temperatura no termômetro de referência, na faixa de 45 e 70,0 ° C foram realizadas 3 operações.

Ao final de cada operação foram geradas planilhas em formato Excel, onde foram calculadas as médias dos 12 termopares, em cada operação. Baseado nas diferenças entre essas médias um algoritmo foi construído com o objetivo de selecionar as faixas de temperaturas constantes. O algoritmo realizava uma filtragem analisando um grupo de 3 células, comparando o valor da célula central com a anterior e com a posterior, e das células marginais entre si. Havendo uma variação igual ou menor a 0,03 em duas dessas comparações, os valores médios de temperatura eram considerados válidos. Os grupos de valores válidos foram então selecionados. Este procedimento foi necessário a fim de se eliminar os valores de temperaturas referentes ao período transiente do banho termostático.

## 2.4. Resultados e Discussões

Após a seleção dos grupos de valores das temperaturas válidas, foram calculadas as médias das temperaturas medidas pelos 12 termopares e comparadas com as médias das temperaturas medidas pelo termômetro de referência, na mesma temperatura.

A seguir, foram construídos histogramas com os dados obtidos a fim de avaliar as tendências dos resultados. O banho não garantia uma temperatura constante abaixo de 45 °C, como previsto pelo fabricante, o que pode ser observado na Fig. 1.



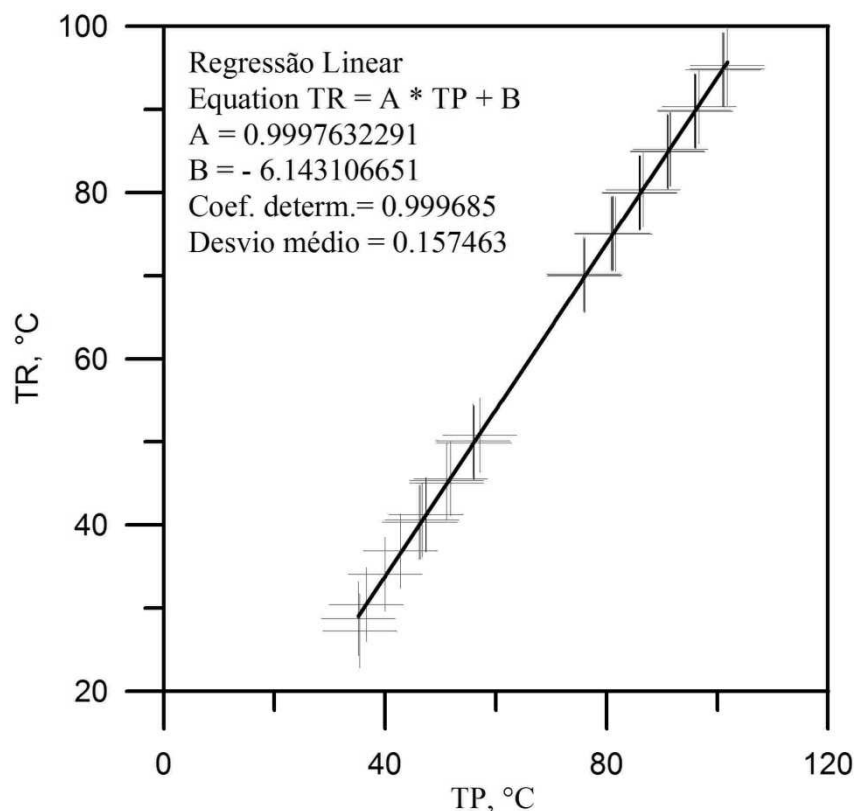
**Figura 1. Histogramas dos resultados da calibração para a operação 4 e temperaturas de 95 °C e ambiente.**

Esse comportamento se repetiu em todas as operações. Os valores de temperatura inferiores a 45°C contém erros devido a não homogeneidade da temperatura do banho. Ainda assim, embora esses erros sejam significativos, essas faixas foram incorporadas a linearização, a fim de contemplar também as temperaturas mais baixas.

Ao final das 5 operações obteve-se 46 pares ordenados. A Figura 2 apresenta os pares ordenados e a função de ajuste linear obtida:

$$TR = 0.9997632291 \times TP - 6.143106651 \quad (1)$$

onde TR refere-se ao termômetro de referência e TP aos termopares.

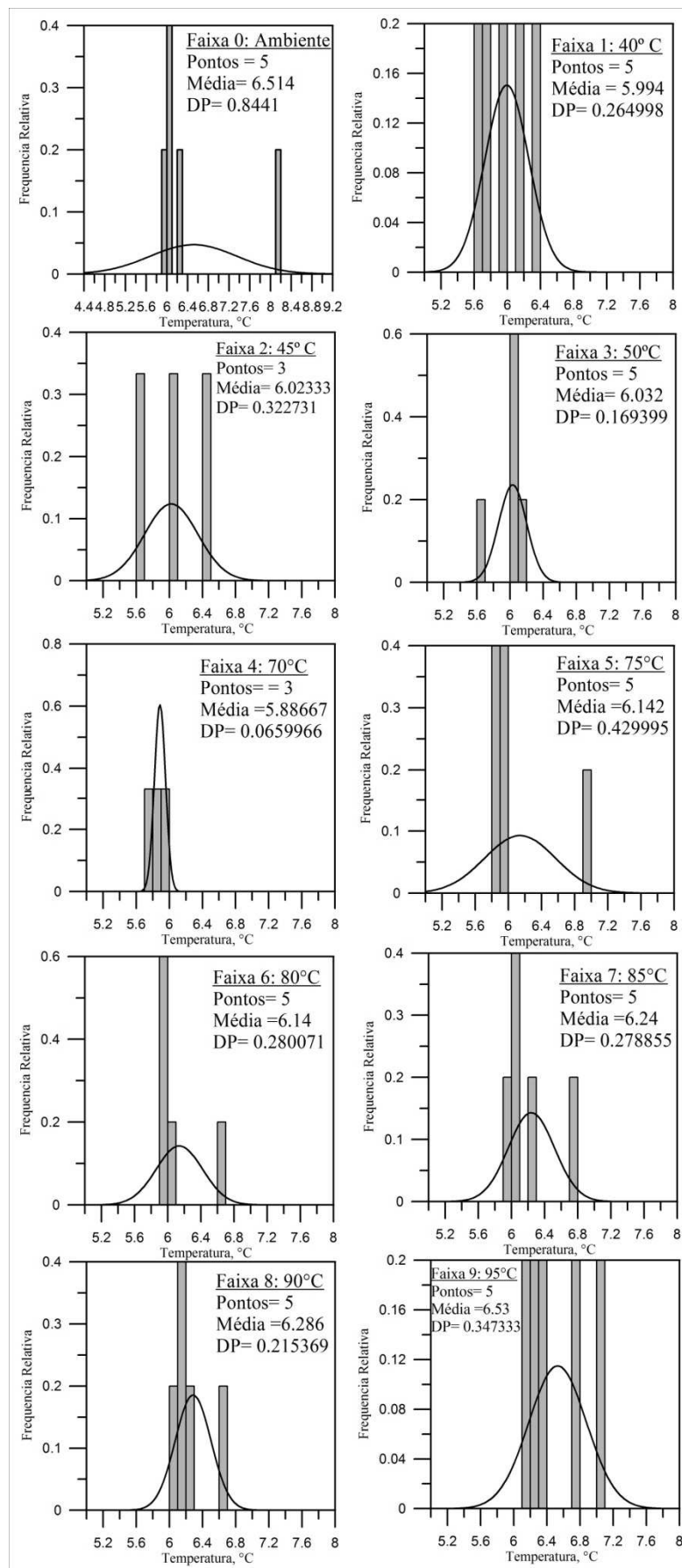


**Figura 2. Temperaturas de referência em função das temperaturas medidas pelos termopares.**

Para cada faixa de temperatura foi construído um histograma, apresentados na Fig. 3, com as diferenças entre os valores medidos dos termopares e do termômetro de referência. Ajustando-se os dados por uma distribuição normal obteve-se valores das médias e desvios padrão para cada uma das faixas de temperaturas, como pode ser visto na Tabela 2.

**Tabela 2. Médias e desvios padrão segundo uma distribuição normal.**

| Temperaturas (°C) | Temperatura média dos termopares (°C) | Temperatura média do termômetro de referência (°C) | Média da diferença entre TP e TR obtido pelo ajuste normal | Desvios Padrão |
|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------|
| Ambiente          | 36,56                                 | 30,46                                              | 6,514                                                      | 0,8441         |
| 40                | 47                                    | 40,62                                              | 5,994                                                      | 0,264998       |
| 45                | 51,1                                  | 45,38                                              | 6,02333                                                    | 0,322731       |
| 50                | 56                                    | 49,92                                              | 5,96                                                       | 0,183848       |
| 70                | 76                                    | 70,1                                               | 5,88667                                                    | 0,0659966      |
| 75                | 81                                    | 75,1                                               | 5,93667                                                    | 0,0329983      |
| 80                | 86                                    | 80                                                 | 6,14                                                       | 0,280071       |
| 85                | 91                                    | 85                                                 | 6,24                                                       | 0,278855       |
| 90                | 96                                    | 89,8                                               | 6,286                                                      | 0,215369       |
| 95                | 101,19                                | 94,8                                               | 6,53                                                       | 0,347333       |



**Figura3. Histogramas dos valores obtidos em cada faixa de medida.**

Não foram observadas grandes discrepâncias entre os valores de desvio padrão em cada faixa de temperatura a não ser para a temperatura ambiente, como esperado, que é inferior a temperatura mínima recomendada pelo fabricante.

#### 2.4.1 Avaliação das incertezas da calibração

Na avaliação das incertezas na calibração do SADT, utilizou-se os valores dos erros de medição dos equipamentos envolvidos na calibração, segundo os manuais dos fabricantes.

A incerteza na calibração do SADT pode ser definida como a soma dos erros dos equipamentos com os erros estatísticos. Esta relação é comumente expressa pela equação [7]:

$$\delta_{cal}^2 = \delta_{ins}^2 + \delta_{est}^2 \quad (2)$$

Onde  $\delta_{ins}$  é a incerteza associada aos instrumentos e  $\delta_{est}$  é a incerteza estatística das medidas. Os erros dos equipamentos foram determinados a partir das informações extraídas dos seus respectivos manuais como mostrado na Tabela 3.

**Tabela 3. Incertezas dos instrumentos**

| Instrumentos                                  | Incerteza em °C |
|-----------------------------------------------|-----------------|
| SADT [3]                                      | 0,6             |
| Termopares [3]                                | 2,2             |
| Termômetro de Referência Intrínseco [5] [6]   | 0,03            |
| Termômetro de Referência Visualização [5] [6] | 0,05            |

Assim, obtiveram-se os seguintes valores:

$$\delta_{TP} = 2,2 \text{ °C} \quad (3)$$

$$\delta_{TR}^2 = \delta_{Intrínseco}^2 + \delta_{Visualização}^2 \quad (4)$$

$$\delta_{Intrínseco} = 0,03 \text{ °C} \quad (5)$$

$$\delta_{Visualização} = 0,05 \text{ °C} \quad (6)$$

$$\delta_{TR} = 0,058 \text{ °C} \quad (7)$$

$$\delta_{PXI+TC-2190} = \delta_{AD} = 0,6 \text{ °C} \quad (8)$$

$$\delta_{ins}^2 = \delta_{TP}^2 + \delta_{TR}^2 + \delta_{AD}^2 \quad (9)$$

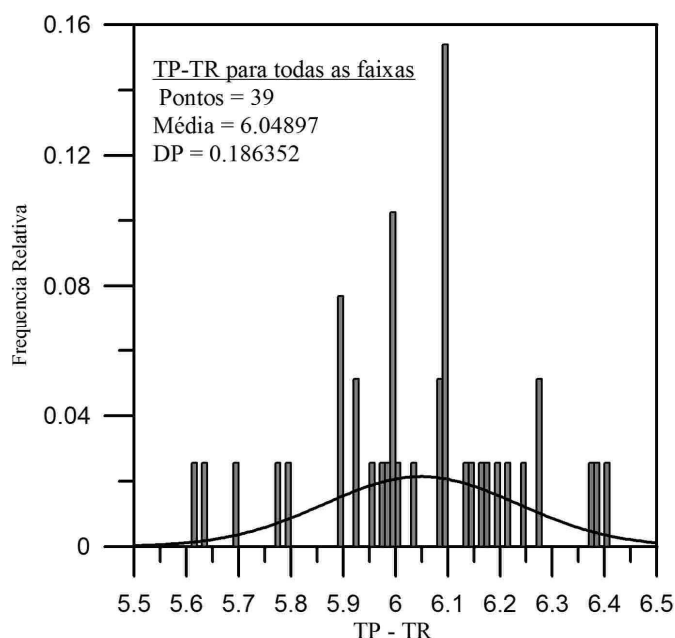
$$\delta_{ins}^2 = (2,2)^2 + (0,058)^2 + (0,6)^2 \quad (10)$$

$$\delta_{ins} = 2,281096 \text{ °C} \quad (11)$$

A incerteza associada as variações estatísticas do experimento foram avaliadas sobre três aspectos: desvios das medidas da média de todos os termopares em relação ao termômetro de

referência ( $\delta_{Var}$ ); Desvios dos valores medidos com relação a reta teórica obtida na linearização ( $\delta_{Lin}$ ); Desvios apresentados entre os termopares ( $\delta_{Rel}$ ).

A incerteza associada aos desvios padrão entre as medidas de TP e TR foi estimada em função do desvio padrão calculado segundo a distribuição normal, extraída do histograma das diferenças TP – TR, como mostrado na Fig.4.



**Figura 4. Histograma das diferenças TP-TR.**

É possível calcular um valor de incerteza garantindo 99,73% ( $P = 0,9973$ ) de confiabilidade dos valores experimentais dentro da faixa mensurada. Esse é um bom valor de confiabilidade [8]. Calculou-se esse valor de incerteza da seguinte forma:

$$\delta = Z * DP \quad (9)$$

onde  $\delta$  é o valor de incerteza, DP é o desvio padrão e Z é um argumento para o cálculo da probabilidade em uma função normal de modo que a probabilidade P dessa função pode ser dada por  $P(Z)$ . Com o valor de confiabilidade de 99,73% ( $P(Z)=0,9973$ ) tem-se  $Z=3,0$  e dessa forma:

$$\delta_{Var} = 3,0 * 0,186352 \quad (10)$$

$$\delta_{Var} = 0,559056 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (11)$$

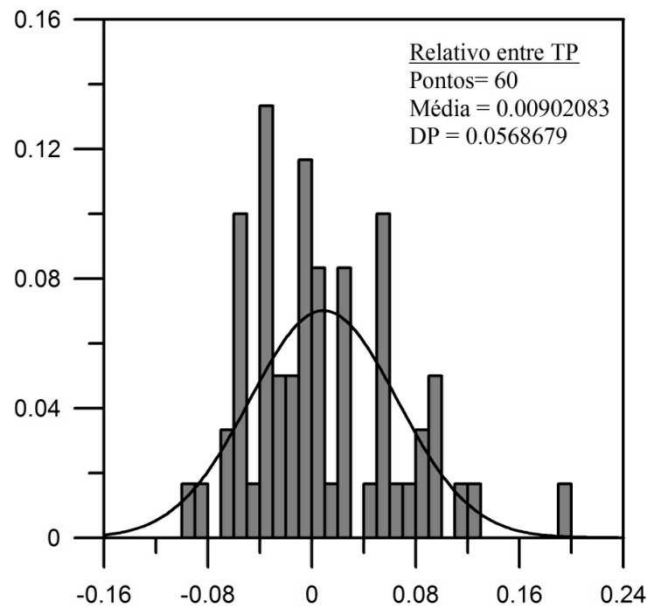
Da mesma forma foi calculada a incerteza devido ao desvio quadrático médio obtido na linearização:

$$\delta_{Lin} = 3,0 * 0,157463 \quad (12)$$

$$\delta_{Lin} = 0,472389 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (13)$$



Calculou-se o desvio dos valores das medições dos termopares em relação ao valor médio para todas as aquisições de temperatura feitas durante as operações, incluindo os valores medidos, durante o transiente, que foram descartados para a linearização. Foi determinado um valor médio desse desvio para cada um dos 12 termopares em cada operação, obtendo-se assim 60 valores de desvios para serem avaliados em um histograma, como pode ser visto na Fig. 4.



**Figura 5. Histograma dos desvios dos valores medidos pelos termopares em relação a média.**

Para o mesmo valor de confiabilidade utilizado anteriormente, foi obtido um valor de incerteza associado a esses desvios:

$$\delta_{\text{Rel}} = 3,0 * 0,0568679 \quad (14)$$

$$\delta_{\text{Rel}} = 0,1706037 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (15)$$

Dessa forma tem-se que :

$$\delta_{\text{Est}}^2 = \delta_{\text{Var}}^2 + \delta_{\text{Lin}}^2 + \delta_{\text{Rel}}^2 \quad (16)$$

$$\delta_{\text{Est}}^2 = (0,559056)^2 + (0,472389)^2 + (0,1706037)^2 \quad (17)$$

$$\delta_{\text{Est}} = 0,751532 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (18)$$

Finalmente a incerteza na calibração pode ser calculada como sendo:

$$\delta_{\text{cal}}^2 = \delta_{\text{Ins}}^2 + \delta_{\text{Est}}^2 \quad (19)$$

$$\delta_{\text{cal}}^2 = (2,281096)^2 + (0,751532)^2 \quad (20)$$

$$\delta_{\text{cal}} = 2,401708 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (21)$$

### 3. CONCLUSÕES

Após a calibração do SADT por comparação com uma referência calibrada, encontrou-se uma diferença média na medição das temperaturas pelo SADT de aproximadamente 6 ° C, com relação ao termômetro de referência, para todas as faixas de temperatura. A função de ajuste dada pela Eq. 1:

$$TR = 0.9997632291 \times TP - 6.143106651$$

deverá ser aplicada aos valores gerados pelo SADT, associada à incerteza da calibração dada pela Eq. 21:

$$\delta_{cal} = 2,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

a fim de corrigir as futuras medições de temperatura a serem realizadas no CCN.

### AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e a CNEN pelo apoio financeiro.

Aos professores Su Jian e Wanderlei Lemos.

Aos técnicos do IEN.

A Monica que cedeu o espaço para concluirmos esse trabalho.

A todos os amigos que participaram direta e indiretamente desse trabalho.

### REFERÊNCIAS

1. Botelho, D. A., “Circuitos Termohidráulicos em Escala Reduzida de Baixa Pressão para Estudos de Remoção de Calor por Circulação Natural de Reatores PWR”, *Relatório IEN-47*, Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, Maio (1993).
2. NAKA Instrumentação Industrial, “Apostila de Temperatura NAKA”.
3. David Potter, “Measuring Temperature with Thermocouples – a Tutorial”, National Instruments, 1996.
4. HAAKE Thermostate, “Betriebsanleitung Thermostate N2, N2 - B, N2 - T”, Germany, 1976.
5. Arno Amarell, “Termometro de liquido em Vidro” Nº 12879, 2005.
6. Arno Amarell, “Termômetro de liquido em Vidro” Nº 5340, 2006.
7. Kline, S. J., McClintock, F. A., “Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments”, *Mechanical Engineering*, January, 1953.
8. Jack P. Holman, *Experimental Methods for Engineers*, McGRAW-HILL, International Editions (1984).